

СЕЗОННАЯ И МНОГОЛЕТНЯЯ ДИНАМИКА ВЛАЖНОСТИ ЛУГОВО-ЧЕРНОЗЕМНЫХ ПОЧВ (ОКСКО-ДОНСКАЯ НИЗМЕННОСТЬ)

© 2024 г. М. А. Смирнова^{a, b, *} (<https://orcid.org/0000-0002-5256-4348>),
Д. Р. Бардашов^{a, b} (<https://orcid.org/0009-0007-2425-1911>),
П. П. Филь^a (<https://orcid.org/0000-0002-9851-5381>),
Н. И. Лозбенив^a (<https://orcid.org/0000-0003-0377-3124>),
А. В. Доброхотов^{a, c} (<https://orcid.org/0000-0002-9368-6229>)

^aПочвенный институт им. В.В. Докучаева, Пыжжевский пер., 7, стр. 2, Москва, 119017 Россия

^bМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119999 Россия

^cАгрофизический научно-исследовательский институт, Гражданский пр-т, 14, Санкт-Петербург, 195220 Россия

*e-mail: summerija@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.02.2024 г.

После доработки 23.05.2024 г.

Принята к публикации 24.05.2024 г.

Проанализирована сезонная динамика объемной влажности залежной и двух пахотных лугово-черноземных почв (Gleyic Chernozem (Siltic, (Aric), Pachic)) в слое 0–60 см, а также уровень залегания грунтовых вод в Токаревском районе Тамбовской области с осени 2022 по лето 2023 гг.; проведено сравнение с режимными наблюдениями за объемной влажностью и уровнем грунтовых вод этих почв за 1969–1971 гг. Залежная лугово-черноземная почва характеризуется большей влажностью, чем почвы пашни; для верхних горизонтов пахотных почв характерна большая частота периодов увлажнения–иссушения и их меньшая непрерывная продолжительность, что подтверждается как данными мониторинга, так и формой карбонатных новообразований. Лугово-черноземные почвы в 2022–2023 гг. были достаточно сухими, несмотря на повышенное по сравнению с климатической нормой среднегодовое количество осадков. Влажность менее влажности завядания в слое 0–20 см пахотных почв устанавливалась с марта 2023 г., в залежной почве – с конца апреля 2023 г. Периоды с влажностью больше наименьшей влагоемкости в слое 0–60 см не были выявлены. Почвы были суше, чем в засушливый 1972 г., когда влажность менее влажности завядания в верхней части профиля наблюдалась в период с июня по сентябрь, во влажные 1969–1970 гг. она не опускалась ниже влажности завядания в слое 0–20 см за весь период наблюдения. Основной причиной такой разницы является изменение уровня залегания грунтовых вод: более 4 м основную часть 2022–2023 гг.; в 1969 г. воды не опускались глубже 2 м, 1971 – глубже 4 м. В результате подпитка почв влагой за счет капиллярного поднятия в 2022–2023 г. не происходила, и водный режим лугово-черноземных почв больше соответствовал водному режиму черноземов.

Ключевые слова: гидрология почв, лесостепь, динамика уровня грунтовых вод, изменение климата, Тамбовская область

DOI: 10.31857/S0032180X24100059, EDN: JXZVPQ

ВВЕДЕНИЕ

Содержание воды в почве является ключевым фактором роста и развития растений, микробиологической активности, процессов растворения, накопления и перемещения веществ в почвах [14, 33]. Учет динамики влажности почв способствует повышению эффективности сельскохозяйственного

производства, совершенствованию климатических прогнозов, а также позволяет дать оценку направленности и интенсивности круговорота воды, углерода, азота и других элементов за различные временные периоды [18, 24, 35].

В последние десятилетия наблюдается резкий рост точек прямого мониторинга почвенной влаж-

ности по всему миру [24, 39], что вместе с косвенными данными о влажности почв, получаемых со спутниковых систем, расширяет возможности управления почвенными ресурсами и прогнозирования опасных природных явлений на разных масштабных уровнях [4, 15, 19, 25, 32]. Регулярно получаемые данные о влажности почв позволяют не только решать важные практические задачи, но и раскрывают особенности структурно-функциональной организации почв [28, 34], углубляют знания об их водном режиме [40], позволяют совершенствовать и верифицировать модели поведения влаги в конкретных ландшафтных условиях [23, 37, 38]. Если не учитывать единичных инициативных исследований, то в России прямой наземный мониторинг почвенной влажности на разных глубинах ведется только на площадках Росгидромета и водобалансовых станциях (в среднем расстояние между точками сбора данных составляет 50–100 км) с частотой получения информации всего 1 раз в 10 сут в течение теплого периода; мониторинг влажности почв в холодный период ведется только на водобалансовых станциях (на территории лесостепи всего одна станция) с частотой раз в месяц [10]. Вместе с тем современные системы мониторинга позволяют автоматизировано собирать и передавать данные о почвенной влажности с необходимой регулярностью [37]. В отличие от классического термостатно-весового метода, реализуемого на водобалансовых станциях и сети мониторинга влажности почв Росгидромета [10], точность определения влажности автоматизированными системами ниже, кроме того, существуют другие ограничения применения метода (выход датчиков из строя, необходимость устойчивого сигнала для передачи данных и др.). Однако возможность наблюдения за динамикой влажности в режиме онлайн в совокупности без выезда на участок делают данные системы привлекательными для использования [36].

Лесостепные почвы занимают около 7% от площади суши, не занятой ледниками: 485 Мга в Евразии, 290 Мга в Северной Америке и 102 Мга в Южной Америке [30, 31]. На долю России приходится пятая часть от площади этих почв в Евразии – основные ареалы лесостепных почв приурочены к центральной части Восточно-Европейской равнины и протягиваются на восток вдоль южной границы Сибири [13, 29]. Коэффициент увлажнения для лесостепных почв равен 1, и небольшие отклонения в условиях поступления и оттока влаги приобретают значение для процессов гумусообразования, выщелачивания, лессиважа. В итоге это выражается в формировании большого спектра различных почв и их соседства в катенах [28]. Лугово-черноземные почвы составляют фон почвенного покрова лесостепи Окско-Донской низменности и широко используются в сельском хозяйстве под пашню [2].

Они формируются в условиях близкого залегания к поверхности (менее 3 м) грунтовых вод. Их водный режим складывается из промачивания почв в весенний период и капиллярного подтягивания влаги в летний [16]. Данные о водном режиме лугово-черноземных почв крайне немногочисленны. Его изучение проводилось под руководством Е.М. Самойловой на территории Токаревского района Тамбовской области в 1969–1972 гг.: влажность почв определялась 2 раза в месяц с июня по октябрь в 1969 г. и с мая по ноябрь в 1970 г., 3–5 раз за весь теплый период в 1971–1972 гг. [16]. Непрерывные наблюдения за динамикой влажности в лугово-черноземных почвах, а также динамикой влажности в холодный период, отсутствуют. Кроме того, по данным [27] климат Окско-Донской низменности за 1980–2020 гг. характеризовался гумидизацией относительно периода 1940–1980 гг. При этом отмечается устойчивое снижение уровня грунтовых вод в центре Восточно-Европейской равнины начиная с 2008 г. [11].

Цель работы – анализ сезонной (осень 2022–лето 2023) и многолетней (1969–1972 и 2022–2023 гг.) динамики влажности почв на примере двух пахотных и одной фоновой лугово-черноземных почв Окско-Донской низменности. Мониторинг влажности почв в 2022–2023 гг. проводили автоматизированными системами сбора данных на том же участке (Тамбовский стационар), где в период 1969–1972 гг. велись работы по изучению водного режима лугово-черноземных почв под руководством Е.М. Самойловой. Гипотеза состоит в том, что изменение условий атмосферного увлажнения почв, а также положения грунтовых вод должны найти отражение в трансформации параметров водного режима лугово-черноземных почв, а использование систем автоматизированного мониторинга влажности почв позволит детально охарактеризовать сезонные изменения почвенной влажности.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Автоматизированный мониторинг объемной влажности проводили для двух пахотных и одной фоновой (залежь) лугово-черноземных почв (Тамбовская область, Токаревский район, рис. 1), расположенных по катене протяженностью 185 м и перепадом высот 70 см. Координаты разрезов: фоновая почва разрез 1 – 52.0406 N, 41.1825 E, пахотные почвы разрез 2 – 52.0418 N, 41.1807 E и разрез 3 – 52.0414 N, 41.1813 E. Местоположение участка и заложения точек мониторинга влажности определяли путем оцифровки и геодезической привязки карты Тамбовского стационара (содержит информацию о положении почвенных разрезов), опубликованного в работе [16]. Сбор данных о влажности почв проводили каждые 3 ч (синхронизировано

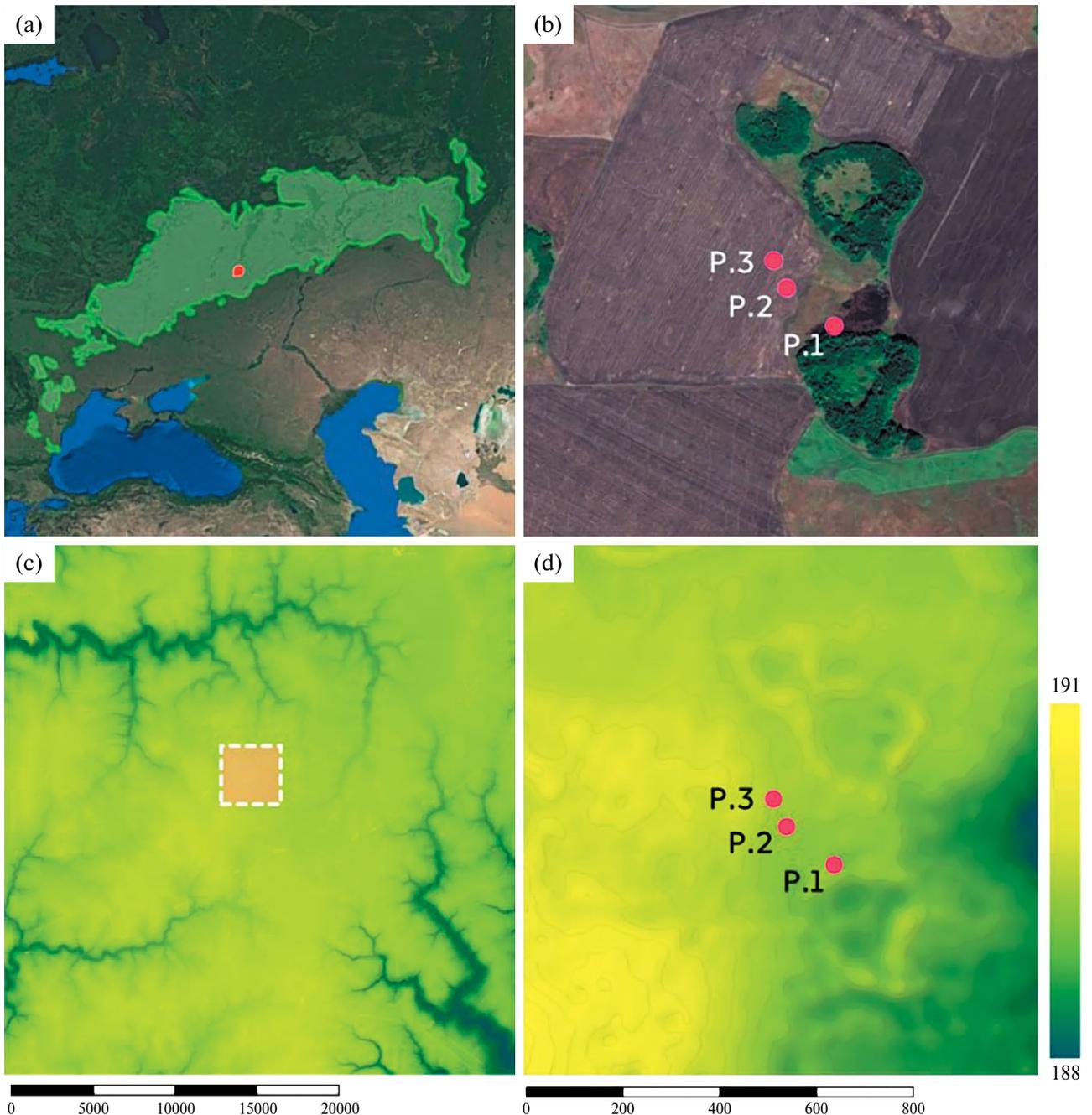


Рис. 1. Расположение района исследований (а) – в пределах лесостепи (границы лесостепи даны по [31]); (б) – положение участка в пределах недренлируемого типа местности Окско-Донской низменности; (с) – космический снимок с указанием положения точек мониторинга; (д) – рельеф участка с указанием точек мониторинга).

с метеорологическими наблюдениями на станциях) с 14 октября 2022 г. Возможность обмена данными с автоматизированной системой прекратилась 10 июля 2023 г. (компания-поставщик сетевых услуг прекратила предоставлять свои услуги на территории РФ); модули идентификации абонента были заменены на фоновом участке, и не заменены на пашне – фермер запретил проводить

работы на пашне до момента сбора урожая. Ввиду очень влажной осени, урожай не был убран в 2023 г. Таким образом, срочные данные о влажности пахотных лугово-черноземных почв собраны с 14 октября 2022 г. по 10 июля 2023 г. (270 сут), для лугово-черноземной почвы – с 14 октября 2022 г. по настоящее время; в работе использованы данные до 9 января (453 сут наблюдений).

Почвы формируются в условиях замедленного дренирования, что вызвано как их свойствами — глинистым составом, так и особенностями участка — выровненной слаборасчлененной и фактически бессточной слабокослонной поверхности (междуречный недренируемый тип местности по [8]). Режим выпадения осадков неравномерный: среднегодовое количество равно 484 мм (за период 1991–2020 гг. по данным метеостанции Жердевка, расположенной в 30 км к юго-западу от участка). Среднегодовая температура составляет 6.8°C. В 2023 г. на пашне выращивался подсолнечник; в состав севооборота входит озимая пшеница, чередуемая с ячменем и подсолнечником. Фоновый участок покрыт разнотравно-костровой растительной ассоциацией.

Ежесуточные метеорологические данные о температуре воздуха и количестве осадков получали с метеостанции г. Жердевка, расположенной в 30 км от участка исследований. Мониторинг объемной влажности почв и уровня грунтовых вод проводили с использованием модернизированного логгера Promodem 120, оборудованного тремя емкостными датчиками влажности почвы на глубинах 20, 40 и 60 см и датчиком уровня грунтовых вод гидростатического типа. Датчики устанавливали в предварительного выбуренные скважины (не разрезы) в целях максимального сохранения естественного сложения почв. Устройства позволяют диагностировать объемную влажность почв в интервале 12–45% (после проведения калибровок в лабораторных условиях погрешность измерений оценена в 2%), уровня грунтовых вод — от поверхности до 5 м. В 5 м от точек мониторинга были заложены полнопрофильные почвенные разрезы, выполнены их морфологические описания, диагностика, а также отбор проб на различные виды анализов в трехкратной повторности (с передней и боковых стенок разреза) каждые 10 см до глубины 1 м (всего 90 образцов). Значения почвенно-гидрологических констант взяты из работы [16] и приведены в табл. 1. Для анализа различий, составляющих

водного баланса, в марте 2023 и 2024 гг., перед началом снеготаяния, выполняли снегомерную съемку на участке исследования по трансектам. Оценку актуальной эвапотранспирации (ЕТ) производили на основе энергобалансовой модели METRIC (Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration) [22] с использованием данных дистанционного зондирования Земли. METRIC использует спутниковые снимки для получения необходимых входных данных для оценки ЕТ: данные теплового инфракрасного излучения для определения температуры поверхности и мультиспектральные данные для расчета вегетационных индексов. Модель METRIC оценивает ЕТ как остаточный член уравнения энергетического баланса через скрытый поток тепла в момент пролета спутника (LE , Вт/м²):

$$LE = R_n - H - G, \quad (1)$$

где R_n — радиационный баланс (Вт/м²), H — турбулентный поток тепла (Вт/м²), G — поток тепла в почву (Вт/м²).

Радиационный баланс — разность между входящими потоками радиации к подстилающей поверхности и уходящими потоками, рассчитывали с помощью уравнения:

$$R_n = R_{S\downarrow} - R_{S\uparrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0)R_{S\downarrow}, \quad (2)$$

где $R_{S\downarrow}$ — суммарная радиация (Вт/м²); $R_{S\uparrow}$ — уходящая коротковолновая радиация (Вт/м²) ($= \alpha R_{S\downarrow}$); α — альbedo поверхности; $R_{L\downarrow}$ — входящая длинноволновая радиация (Вт/м²); $R_{L\uparrow}$ — уходящая длинноволновая радиация (Вт/м²); $(1 - \varepsilon_0)R_{S\downarrow}$ — часть входящей длинноволновой радиации, отраженной от поверхности (Вт/м²); ε_0 — излучательная способность поверхности.

Турбулентный поток тепла — это аэродинамическая функция, которую определяли с использо-

Таблица 1. Значения почвенно-гидрологических констант для описанных почв согласно данным [16]

Почва	Глубина, см	Влажность завядания (ВЗ)	Наименьшая влагоемкость (НВ)	Полная влагоемкость (ПВ)
		% от объема почвы		
Черноземно-луговая (разрез 1)	0–8	18.3	36.5	72.1
	8–40	20.0	35.0	64.6
	40–70	21.7	34.0	57.3
Черноземно-луговая пахотная (разрезы 2, 3)	0–25	19.8	33.2	61.6
	25–50	21.2	26.9	61.6
	50–64	24.4	32.6	53.3

ванием универсальных функций для коррекции аэродинамического сопротивления:

$$H = \frac{\rho_a C_p dT}{r_a}, \quad (3)$$

где ρ_a – плотность воздуха (кг/м³); C_p – удельная теплоемкость воздуха (Дж/кг); dT – разность температур воздуха между двумя высотами z_1 и z_2 (0.1 и 2 м соответственно), r_a – аэродинамическое сопротивление (с/м).

Поток тепла в почву (G) определяли исходя из рассчитанных значений радиационного баланса, температуры (T_s) и альбедо (α) подстилающей поверхности, вегетационного индекса NDVI.

$$\frac{G}{R_n} = (T_s - 273.15)(0.0038 + 0.0074\alpha) \times (1 - 0.98NDVI^4). \quad (4)$$

Эвапотранспирацию в момент пролета спутника (ET_{inst} , мм/ч) рассчитывали путем деления скрытого потока тепла (LE) на скрытую теплоту парообразования:

$$ET_{inst} = 3600 \frac{LE}{\lambda \rho_w}, \quad (5)$$

где ρ_w – плотность воды (кг/м³); λ – скрытая теплота парообразования, Дж/кг.

Суточные суммы актуальной эвапотранспирации (ET , мм/сут) рассчитывали как:

$$ET = ET_r F \cdot ET_r, \quad (6)$$

где $ET_r F$ – часть энергии, затрачиваемая на испарение; ET_r – эталонное суммарное испарение за сутки, мм/сут.

$ET_r F$ определяется как:

$$ET_r F = ET_{inst} / ET_{r_inst}. \quad (7)$$

ET_{r_inst} – эталонная эвапотранспирация в момент пролета спутника, мм/ч. Эталонную эвапотранспирацию за сутки рассчитывали на основе модифицированного уравнения Пенмана–Монтейса для высокой растительности [21]:

$$ET_r = \frac{0.408\Delta(R_{n_24} - G_{24}) + \gamma \frac{1600}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.38u_2)}, \quad (6)$$

где R_{n_24} – радиационный баланс за сутки (МДж (м² сут)), G_{24} – поток тепла в почву за сутки (МДж/(м² сут)), T_a – среднесуточная температура воздуха (°С), u_2 – среднесуточная скорость ветра на высоте 2 м (м/с), e_s – давление насыщения водяного пара (кПа), e_a – упругость водяного пара (кПа),

Δ – угловой коэффициент касательной к кривой взаимосвязи давления насыщения водяного пара и температуры воздуха в точке, соответствующей T_a (кПа/°С), γ – психрометрическая постоянная (кПа/°С).

Эталонную эвапотранспирацию в момент пролета спутника также рассчитывали на основе уравнения Пенмана–Монтейса:

$$ET_{r_inst} = \frac{0.408\Delta(R_{n_24} - G_{24}) + \gamma \frac{66}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.25u_2)}. \quad (7)$$

В качестве входных метеорологических данных модели METRIC использовали данные глобального климатического реанализа CFSV2 [35], содержащие информацию о радиационных потоках, необходимые для оценки эталонной эвапотранспирации за сутки. В качестве спутниковых данных использовали спутники серии Landsat 8–9, так как они имеют среднее пространственное разрешение (30 м), подходящее для масштаба текущего исследования. На борту Landsat 8–9 присутствует сенсор регистрации исходящего длинноволнового инфракрасного излучения, необходимого входного параметра модели. Для проведения симуляции по модели METRIC отобрали серию безоблачных спутниковых снимков в даты: 2022-10-25, 2022-12-04, 2023-04-02, 2023-04-11, 2023-04-19, 2023-05-04, 2023-05-29, 2023-07-07, 2023-07-16, 2023-08-09, 2023-09-01, 2023-09-17, 2023-09-26, 2023-10-04. Значения для исследуемых участков получали из раstra ET по координатам разрезов 1 и 3.

Для верификации расчета актуальной эвапотранспирации по данным спутниковой съемки и модели METRIC дополнительно рассчитывали эталонную эвапотранспирацию для безоблачного неба по методике FAO-56 [20]. Для расчета эталонной эвапотранспирации использовали данные ближайшей стандартной станции гидрометеосети Жердевка (WMO ID – 34047; 51°0' N; 41°9' E; высота над уровнем моря – 148 м).

Для общей характеристики свойств почв, оценки их водоудерживающей способности, а также расчета коэффициентов степени переувлажнения почв, в лабораторных условиях в предварительно высушенных и гомогенизированных образцах выполнили следующие виды анализов: pH водной вытяжки методом потенциометрии при соотношении почва : вода 1 : 2.5; анионный и катионный состав водной вытяжки методом ионной хроматографии; содержание обменных катионов по методу Пфедера в модификации Молодцова и Игнатовой [9] с определением концентрации извлеченных катионов методами пламенной фотометрии и атомно-абсорбционной спектрометрии; содержание общего и неорганического углерода методом сухого сжигания на приборе Метавак; гранулометрический

состав методом лазерной дифракции с предварительной ультразвуковой обработкой с суммарной энергией равной 450 Дж/мл; аморфное железо в оксалатной вытяжке по Тамму с фотометрическим окончанием, несиликатное железо в дитионит-цитратно-бикарбонатной вытяжке по Мера–Джек-сону с расчетом коэффициента Швертмана (отношение оксалато- и дитиониторастворимой форм железа); оптические плотности щелочных и пирофосфатных вытяжек при длине волны 440 нм для расчета коэффициента степени гидроморфизма в поверхностных образцах почв [17].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Почвы. Морфологические свойства. Пахотные почвы и залежная почва (рис. 2) близки по морфологическому строению. Для них характерен мощный гумусовый профиль, присутствие карбонатов и срединный горизонт с явными признаками переувлажнения. Формула почвенного профиля почвы залежи (в скобках указана нижняя граница горизонта, см) согласно [12]: AN(20)–ANlc(53)–ABca(85)–BCAnc,g,q(106)–Q. В отличие от почвы залежи, в пашне верхний горизонт является агрочерногумусовым (PN), мощностью 25–28 см, а залегающий глубже черногумусовый горизонт не содержит лабильных форм карбонатов (отсутствует признак lc). Формула почвенного профиля пахотных почв состоит из следующего набора горизонтов: PN – AN – ABca – BCAnc,g,q–Q. Мощность гумусового профиля пахотных почв, в целом, соответствует таковой почвы залежи и варьирует в пределах 85–100 см. Глубина вскипания сильно

отличается – она составляет 20 см в залежной почве и около 40 см в почвах пашни. Вторичные формы карбонатов представлены пропиточными формами, белоглазкой, журавчиками. Последние встречаются только в пахотных почвах. Морфохроматические признаки переувлажнения в виде оливковых пятен, небольших сизоватых и сизовато-охристых зон вблизи мелких пор и трещин диагностированы на глубине 85 см в почве залежи и 100–110 см в почвах пашни, железо-марганцевые примазки и конкреции – с 70 (разрез 1) и 80–90 см (разрезы 2, 3). Почвы диагностированы как лугово-черноземные пахотные и лугово-черноземные согласно Классификации и диагностике почв СССР (1977) и черноземы квазиглеевые миграционно-мицелярные глееватые (разрез 1), агрочерноземы квазиглеевые конкреционные глееватые (разрезы 2, 3) согласно Полевому определителю почв [12].

Таким образом, основные морфологические отличия почв заключаются в типе строения карбонатного профиля (глубине вскипания, формах вторичных карбонатов) и глубине обнаружения морфохроматических признаков переувлажнения, новообразований железа, марганца (рис. 2). Если глубина обнаружения вторичных карбонатов зависит в большей мере от парциального давления углекислого газа (следовательно, микробиологической активности), чем от гидротермических условий, то формы карбонатных новообразований позволяют провести интерпретацию условий испарения и концентрации растворов. Согласно [5, 18], наличие крупных конкреционных новообразований и отсутствие зон с миграционными формами, свидетельствует о резком испарении почвенных растворов в почвах, в то время как присутствие миграционных форм может быть интерпретировано как формирование в почвах условий с продолжительным и постепенным испарением растворов в поры-каналы. Таким образом, сравнительный анализ морфологического строения почв позволяет высказать гипотезу о более контрастном водном режиме пахотных почв (большей амплитуде влажности почв) по сравнению с почвой залежи, а также их меньшей влажности, поскольку морфохроматические признаки переувлажнения и железо-марганцевые конкреции в них обнаружены на большей глубине, чем в фоновой почве – что, в целом, соответствует положением этих почв в катене.

Физические, химические и физико-химические свойства почв. Все исследованные почвы характеризуются глинистым гранулометрическим составом (содержание физической глины варьирует от 50 до 65%, табл. 2), что обуславливает низкую скорость фильтрации влаги. Почвы богаты органическим веществом. Содержание органического углерода достигает 7.7% в верхних 10 см залежной почвы. Лугово-черноземная почва залежи слабощелочная

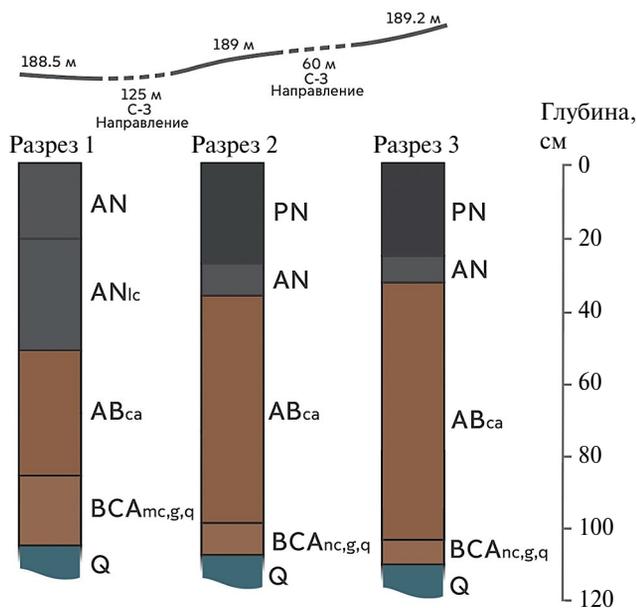


Рис. 2. Почвы участка исследования.

Таблица 2. Свойства лугово-черноземных почв (усредненные данные по трем проворностям)

Глубина, см	pH	Общее содержание солей, мг/л	Ионный состав водной вытяжки, смоль(экв)/кг								C ^{opt} (C ^{opt} - C ^{heopt}), %	C ^{heopt} , %	Fe _d , %	Fe _{ox} , %	Соержание физической глины (<0,01)	Коэффициент степени гидроморфизма	
			Na ⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻							SO ₄ ²⁻
Залежная лугово-черноземная почва (Gleyic Chernozem (Siltic, Pachic), разрез 1)																	
0-10	7.6	120.0	0.97	0.00	0.04	0.39	0.01	0.09	0.01	0.00	0.10	1.20	7.68	0.00	1.55	0.00	55.1
10-20	7.6	118.0	0.15	0.01	0.40	0.81	0.03	0.02	0.01	0.00	0.18	1.14	6.65	0.12	2.04	0.07	57.1
20-30	8.2	77.0	0.09	0.02	0.26	0.53	0.01	0.08	0.01	0.00	0.07	0.74	5.35	0.51	1.82	0.07	63.8
30-40	7.7	120.0	1.07	0.03	0.06	0.68	0.06	0.24	0.02	0.00	0.05	1.46	3.97	0.69	1.92	0.09	61.4
40-50	7.6	110.0	1.72	0.03	0.04	0.23	0.02	0.06	0.02	0.00	0.11	1.81	2.93	1.31	1.84	0.10	61.7
50-60	8	140.0	0.70	0.02	0.29	0.40	0.11	0.03	0.01	0.00	0.03	1.23	2.30	0.91	1.78	0.10	60.2
60-70	8.6	30.0	0.76	0.02	0.17	0.49	0.22	0.07	0.01	0.00	0.05	1.11	1.53	1.14	-	-	60.6
70-80	9.1	145.0	0.94	0.02	0.17	0.33	0.28	0.07	0.01	0.00	0.08	1.02	1.30	2.51	2.00	0.08	61.8
80-90	8.3	155.0	1.21	0.01	0.14	0.27	0.29	0.06	0.02	0.00	0.05	1.22	0.96	2.99	-	-	64.5
90-100	8.6	185.0	1.36	0.04	0.17	0.37	0.13	0.03	0.01	0.00	0.02	1.74	0.88	2.35	-	-	61.2
Пахотная лугово-черноземная почва (Gleyic Chernozem (Siltic, Argic, Pachic), разрез 2)																	
0-10	6.7	101.0	0.78	0.04	0.07	0.41	0.01	0.13	0.03	0.01	0.10	1.02	7.49	0.00	1.98	0.09	54.20
10-20	6.7	135.0	0.77	0.02	0.06	0.61	0.03	0.18	0.02	0.03	0.20	1.00	7.69	0.00	1.7	0.11	58.30
20-30	6.9	86.0	0.59	0.01	0.06	0.35	0.01	0.23	0.00	0.00	0.14	0.62	5.98	0.00	1.42	0.13	58.69
30-40	6.7	73.0	0.48	0.02	0.05	0.48	0.01	0.18	0.00	0.00	0.10	0.73	4.40	0.00	1.36	0.05	64.35
40-50	6.7	87.0	0.65	0.02	0.04	0.35	0.01	0.20	0.03	0.02	0.17	0.64	3.40	0.00	1.93	0.44	57.41
50-60	7.1	124.0	0.65	0.01	0.06	0.46	0.03	0.17	0.00	0.05	0.20	0.73	2.93	0.39	2.43	0	56.71

Окончание табл. 2

Глубина, см	pH	Общее содержание солей, мг/л	Ионный состав водной вытяжки, смоль(экв)/кг										$C_{\text{неорг}}^{\text{opt}} - C_{\text{неорг}}^{\text{обн}}$, %	$C_{\text{неорг}}^{\text{opt}}$, %	Fe _d , %	Fe _{ox} , %	Содержание физическо-глины (<0,01)	Коэффициент степеней гидроморфизма
			Na ⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻						
60–70	7.6	164.0	0.99	0.02	0.07	0.84	0.03	0.19	0.02	0.00	0.11	1.55	1.90	1.46	2.31	0.03	61.39	1.96
70–80	7.7	138.0	0.97	0.02	0.04	0.39	0.04	0.13	0.01	0.01	0.13	1.10	1.92	2.08	2.18	0.05	61.95	
80–90	7.7	108.0	1.88	0.01	0.09	0.58	0.01	0.02	0.01	0.00	0.18	2.34	–	2.12	2.19	0.25	62.00	
90–100	7.8	101.0	0.78	0.04	0.07	0.41	0.01	0.13	0.03	0.01	0.10	1.02	–	2.14	2.16	0.26	61.85	
Пахотная лугово-черноземная почва (Gleyic Chernozem (Siltic, Argic, Pachic), разрез 3)																		
0–10	6.6	51.0	0.18	0.03	0.11	0.31	0.01	0.11	0.01	0.00	0.12	0.39	5.61	0	1.1	0.03	61.3	1.88
10–20	6.9	45.0	0.18	0.02	0.10	0.29	0.01	0.09	0.00	0.00	0.04	0.45	5.98	0	1.2	0.04	60.9	
20–30	6.9	55.0	0.24	0.04	0.07	0.31	0.01	0.12	0.02	0.00	0.09	0.43	5.59	0	0.9	0.07	63.6	
30–40	6.9	91.0	0.54	0.02	0.13	0.23	0.01	0.06	0.02	0.02	0.07	0.74	4.83	0.19	1.36	0.05	64.2	
40–50	6.9	54.0	0.27	0.02	0.08	0.33	0.01	0.10	0.00	0.00	0.04	0.54	3.38	0.32	1.87	0.09	63.4	
50–60	7	99.0	0.52	0.02	0.17	0.33	0.02	0.15	0.02	0.00	0.06	0.78	2.56	0	2.2	0.1	61.8	
60–70	7.8	128.0	0.73	0.03	0.20	0.35	0.06	0.22	0.01	0.00	0.06	0.95	2.24	0.38	–	–	57.7	
70–80	7.6	170.0	0.90	0.02	0.29	0.56	0.04	0.11	0.00	0.00	0.16	1.47	2.77	1.11	2.3	0.05	61.2	
80–90	7.9	144.0	1.03	0.05	0.19	0.31	0.04	0.13	0.01	0.00	0.11	1.29	–	1.49	–	–	55.7	
90–100	8.2	176.0	1.35	0.02	0.25	0.44	0.15	0.15	0.01	0.01	0.11	1.64	–	2.32	2.32	0.12	50.7	

в пределах всего почвенного профиля, пахотные – нейтральные–слабощелочные. Содержание карбонатов достигает максимума (от 10 до 17.5%) вблизи 1 м во всех почвах. Почвы слабо засолены в пределах всего почвенного профиля; единично встречаются слои с содержанием легкорастворимых солей менее 0.1% от сухой массы почвы (только в пахотных почвах) и более 0.15% (только в лугово-черноземной почве залежи). Засоление, преимущественно, содовое Mg–Na (реже содовое Mg, содовое Na), на некоторых глубинах в пахотных почвах – хлоридно-содовое Mg–Na. Залежная лугово-черноземная почва в среднем содержит больше легкорастворимых солей, чем пахотные почвы. Содержание растворимых оксалатом форм железа в почвах крайне низкое. Рассчитанные на основе соотношения оксалато- и дитиониторастворимого железа коэффициенты Швертмана характеризуются очень низкими значениями. Согласно полученным данным, происходит увеличение степени переувлажнения почв от пахотной почвы разреза 2 к пахотной почве разреза 3 и к залежной лугово-черноземной почве. Внутри профиля пахотных почв диагностировано увеличение степени увлажнения в подпахотном горизонте. В целом низкие значения содержания железа и рассчитанные на их основе коэффициенты не позволяют считать критерий Швертмана надежным для исследованных лугово-черноземных почв. Согласно значениям коэффициентов степени гидроморфизма можно выделить следующий ряд увеличения продолжительности поверхностного переувлажнения почв: пахотная почва (разрез 3) – пахотная почва (разрез 2) – почва залежи (разрез 1). Этот ряд совпадает с положением почв в пределах катены.

На основании сравнительного анализа свойств почв можно сделать вывод о высокой степени сходства исследованных залежной и пахотных лугово-черноземных почв. Залежная почва характеризуется большей щелочностью и большим содержанием легкорастворимых солей, что может сказываться на разнице в скорости высыхания почв (более засоленные почвы дольше высыхают по сравнению с незасоленными почвами при прочих равных условиях [1]). В соответствии со значениями коэффициента степени гидроморфизма, залежная почва характеризуется большей

продолжительностью поверхностного переувлажнения, что подтверждается ее положением в рельефе.

Осадки и температурный режим за период наблюдения. 2022 и 2023 гг. характеризовались повышенным количеством выпавших осадков относительно среднемноголетних значений в 484 мм (табл. 3). Режим их выпадения был неравномерным.

Осень 2022 г. была относительно влажной, сумма осадков за октябрь и середину ноября составила 84 мм. С середины ноября по начало марта установился отрицательный температурный режим. В конце декабря – начале января наблюдалась оттепель. Зима была малоснежной, что подтверждается как наблюдениями с метеостанции, так и выполненной снегомерной съемкой на участке исследования. Высота снежного покрова в пределах исследованных участков неоднородна. Количество снега, задерживающегося на залежи, в 7 раз больше, чем на пашне. Сформированные метелевым переносом участки накопления снега были приурочены к краевым участкам западин, где мощность снега варьировала от 50 до 90 см в зависимости от микро-рельефа и теневого эффекта древесного яруса, запас влаги в снеге изменялся от 90 до 770 мм. В центральной части западин на луговом кочкарнике мощность снега варьировала от 8 до 20 см, запас влаги от 50 до 150 мм. По результатам проведенной снегомерной съемки 9 марта 2023 г. и 21 февраля 2024 г. в пределах водосборной площади на пашне снег лежал однородным слоем (мощность от 15 до 17 см). В локальных участках вдоль древесной растительности у западин мощность снега изменялась от 90 до 150 см. Всего за холодный период 2022–2023 гг. выпало 165 мм осадков, из них – 108 мм до завершения зимней оттепели (рис. 3).

С середины марта наблюдалось постепенное повышение температуры воздуха; среднесуточная температура редко опускалась ниже 15°C начиная с середины мая. Сумма жидких осадков за весенний период составила 141 мм. Жаркое и влажное лето с суммой осадков в 190 мм сменилось очень сухим и теплым сентябрем, прохладными и очень мокрыми октябрем, ноябрем. Сумма выпавших осадков за эти два осенних месяца составила 170 мм. Таким образом, особенности погоды 2022–2023 гг. – небольшое количество

Таблица 3. Климатические показатели по данным метеостанции г. Жердевка Тамбовской области

Параметр	2005	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Сумма осадков за год, мм	386	421	311	423	515	626	477	329	566	644	521	507	451	444	528	634	634
Среднегодовая t , °C	8.6	7.6	7.2	7.9	6.3	7.4	7.7	7.1	7.7	7.5	7.3	6.8	8	8.5	7.7	7.6	8.1

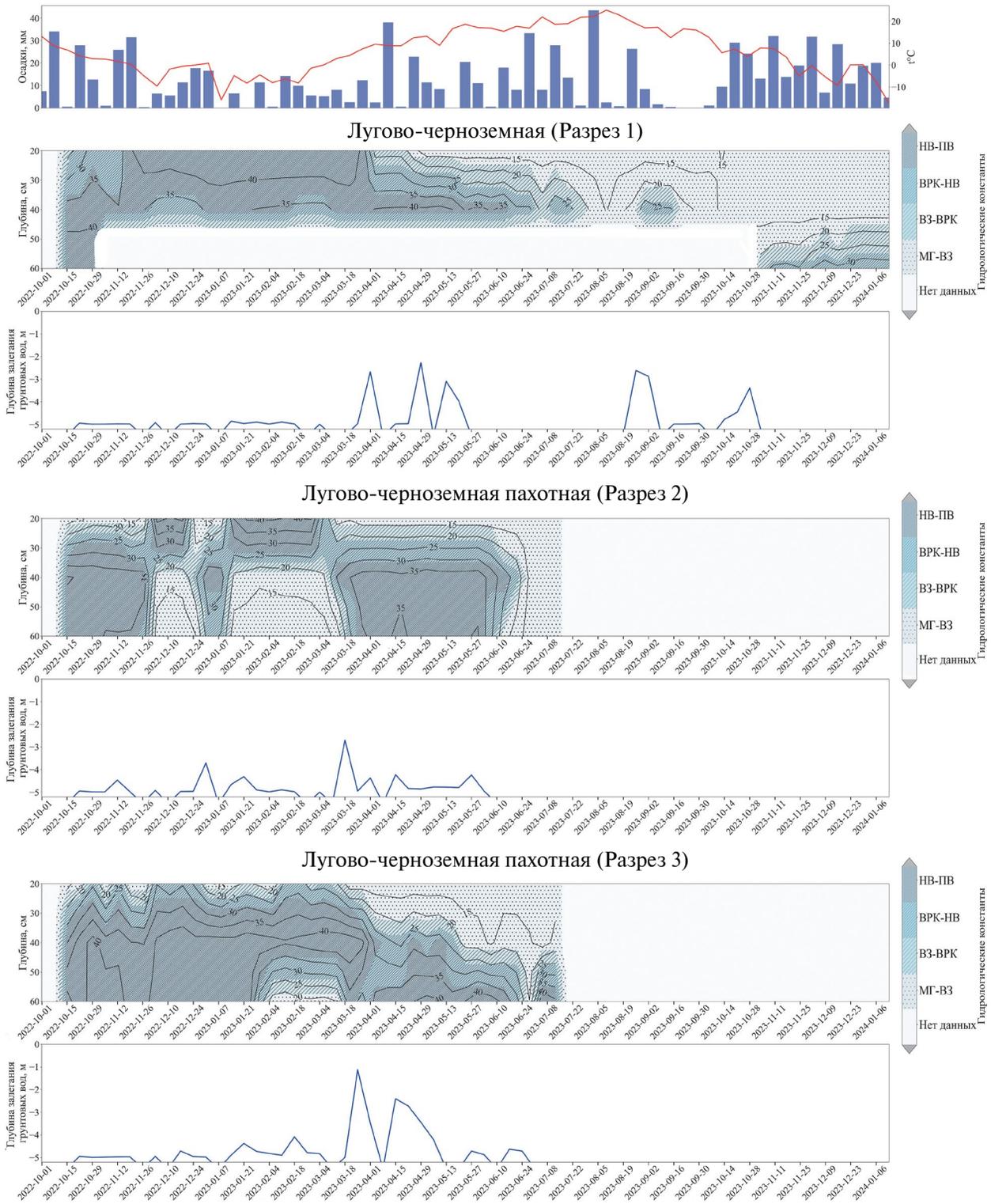


Рис. 3. Динамика влажности и мониторинга залегания грунтовых вод лугово-черноземных почв на протяжении периода мониторинга 01.10.2022–09.01.2024. В верхней части рисунка – осадки и температура в течение рассматриваемого периода, ниже – динамика показателей для отдельных почв (разрезы 1–3). Для каждой из почв верхний рисунок: хроноизоплетами показаны значения объемной влажности (%), цветом фон со штриховкой – значения почвенно-гидрологических констант, курсивом – значения объемной влажности для почвенно-гидрологических констант; нижний рисунок – уровень грунтовых вод. Почвенно-гидрологические константы: ПВ – полная влагоемкость, НВ – наименьшая влагоемкость, ВРК – влажность разрыва капилляров, определенная как 0.7НВ; ВЗ – влажность завядания; МГ – максимальная гигроскопичность.

снега и зимняя оттепель — не создали существенных предпосылок для весенней влагозарядки грунтовых вод в 2023 г.

Уровень грунтовых вод. Уровень залегания грунтовых вод на участке исследования неодинаковый, что может быть вызвано гетерогенностью залегания кровли днепровской морены, выступающей в качестве водоупора на глубине 8 метров [16]. С 2016 и по 2021 гг. в районе исследования устанавливалась сухая и достаточно жаркая (за исключением относительно холодного 2018 г.) погода, что, вероятно, повлияло на уровень залегания грунтовых вод на момент проведения мониторинговых исследований. Расположенные ближе друг к другу почвы пашни характеризуются сходными особенностями поведения уровня грунтовых вод за период наблюдения; уровень их залегания находился в промежутке 4–5 м от дневной поверхности большую часть времени. Диагностировано несколько периодов подъема грунтовых вод в зимний (конец декабря–январь) и весенний период (в марте и апреле) до глубины 3 м и ближе к поверхности. Продолжительность этих периодов варьировала от одной до двух недель. Периоды поднятия грунтовых вод связаны со снеготаянием — оттепелью в конце декабря 2022 г. и снеготаянием в середине марта. Отсутствие резкого увеличения влажности почв в период снеготаяния, предшествующего повышению уровня грунтовых вод, может свидетельствовать о недостатке фронтального промачивания почв и подпитке грунтовых вод за счет преимущественных потоков. Грунтовые воды для почвы залежи находились на глубине более 5 м практически весь период наблюдений. Кратковременные подъемы вод наблюдались весной 2023 г. в период снеготаяния, в конце августа и осенью 2023 г., вероятно, в результате обильных дождей.

Наблюдаемая динамика уровня грунтовых вод в 2022–2023 гг., в целом, соответствует таковой, наблюдаемой Е.М. Самойловой для данного участка

в теплые периоды 1968–1973 гг.: уровень грунтовых вод весной залегает на меньшей глубине, чем летом. Вместе с тем наблюдаемые значения глубин варьировали от 0 до 2 м во влажные 1968–1970 гг. (осадки около 510 мм/год) и от 1 до 4 м в сухие 1971–1973 гг. (осадки около 470 мм/год) [16]. Таким образом, несмотря на повышенное количество осадков за 2022 и 2023 гг. (634 мм/год) наблюдается более глубокое залегание грунтовых вод на участке, чем даже в относительно сухие 1971–1973 гг. Следовательно, произошло общее опускание уровня грунтовых вод на данной территории. Выявление причин опускания грунтовых вод требует специального дополнительного исследования.

В качестве гипотезы понижения уровня грунтовых вод может быть сформулировано следующее положение: залегание уровня грунтовых вод на глубине более 5 м большую часть периода наблюдений 2022–2023 гг. является результатом ряда факторов: (1) экстремально сухого 2010 г., вероятно, повлекшего существенное опускание грунтовых вод (согласно опросам местных жителей, с 2010 г. наблюдается планомерное снижение уровня воды в колодцах), (2) увеличения потребления грунтовых вод в районе участка исследования в результате открытия крупной птицефабрики в 2013 г., (3) отсутствия подпитки грунтовых вод атмосферными осадками из-за их более глубокого залегания, чем прежде, (4) аномально теплые зимы последних лет и отсутствие условий к формированию мощного снежного покрова и большого объема талых вод, глубоко промачивающего почву и подпитывающего грунтовые воды.

Выдвинутая гипотеза соответствует результатам непрерывного мониторинга за уровнем грунтовых вод в Докучаевском колодце (Каменная степь, Воронежская область), где, начиная с 2008 г. отмечается устойчивый тренд его снижения [11], а также данным о маловодности водотоков бассейна Дона в период 2007–2015 гг. [7], к которому относится участок исследования.

Таблица 4. Продолжительность периода (сут) с влажностью меньшей или большей гидрологических констант за период наблюдения с 14.10.22 по 10.07.23 (270 сут)

Глубина, см	Разрез 1			Разрез 2			Разрез 3		
	>НВ	<ВЗ	НВ–ВЗ	>НВ	<ВЗ	НВ–ВЗ	>НВ	<ВЗ	НВ–ВЗ
20	146	80	44	69	175	26	16	182	72
40	233	3	34	140	76	54	161	36	73
60	Н.д.	Н.д.	Н.д.	121	110	39	197	32	41
На глубинах 20 и 40 см	0	3	132	0	15	255	0	36	218
На всех глубинах	Н.д.	Н.д.	Н.д.	0	15	255	0	4	266

Мониторинг влажности почв. Сезонная и многолетняя динамика. Подпитка почв влагой за счет капиллярного поднятия из грунтовых вод на участке исследования происходит только при их положении на глубине не более 3 м [16]. В 2022–2023 гг. такое положение грунтовых вод наблюдалось лишь в периоды снеготаяния в результате подпитки грунтовых вод талой водой, просачивающейся сквозь почвенную толщу по путям в виде преимущественных потоков. Следовательно, основным источником влаги для исследованных почв в настоящее время являются атмосферные осадки.

Объемная влажность верхнего слоя 0–20 см почвы залежи на начало наблюдения находилась в интервале влажность завядания (ВЗ)—наименьшей влагоемкости (НВ), с середины октября до начала апреля — была в интервале НВ—полной влагоемкости (ПВ) (рис. 3). Содержание влаги менее 15% на 20 см наблюдалось с конца апреля. Период с оптимальными значениями влажности (ВЗ—НВ) составляет всего 44 сут на глубине 20 см и 34 сут на глубине 40 см, и приходится на конец весны; зимой 2022–2023 гг. и весной 2023 г. почва, преимущественно была переувлажнена (влажность более НВ). В летний период почва испытывала сильное иссушение — обильные осенние осадки в октябре и ноябре (170 мм) были недостаточны для восполнения влаги в почвах: на начало января 2024 г.

объемная влажность почв на глубинах 20 и 40 см остается меньше ВЗ. Отсутствие мониторинговых наблюдений на глубине 60 см в период с начала ноября 2022 по конец октября 2023 г. по причине выхода из строя датчика (замена проведена в октябре 2023 г.), не позволяет достоверно оценить состояния почвы на этой глубине. Вместе с тем данные по объемной влажности за начало октября 2022 г., ноябрь–декабрь 2023 г., а также кратковременное понятие грунтовых вод до уровня в 3 м в конце августа, позволяют предположить, что содержание влаги на этих глубинах было выше ВЗ большую часть периода.

Верхние 20 см пахотных лугово-черноземных почв характеризовались объемной влажностью ниже ВЗ на начало мониторинговых наблюдений (рис. 3). В периоды зимней оттепели и весеннего снеготаяния влажность верхнего слоя увеличивалась до значений 35 (разрез 3) и 40% (разрез 2). Однако затем почва быстро иссушалась за счет просачивания воды в более глубокие слои (рис. 4). Начиная с конца марта, влажность верхнего пахотного слоя составляла менее 15%, т.е. более, чем на месяц раньше, чем в почве залежи. Такая разница, во-первых, может быть связана с меньшим поступлением влаги на поверхность пахотных почв в результате снеготаяния; во-вторых, открытой поверхностью пахотных почв ранней весной, а значит

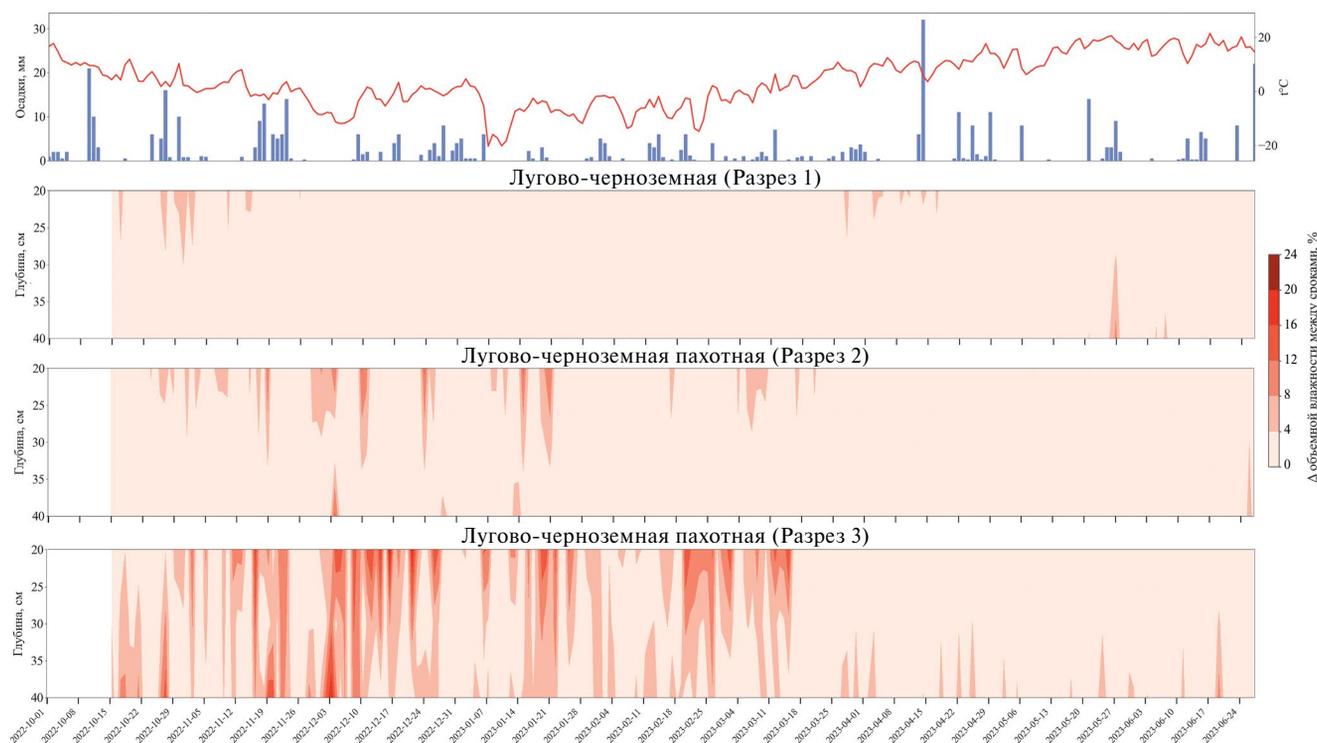


Рис. 4. Хроноизоплеты разностей влажностей между соседними сроками наблюдений в слое 20–40 см за период 10.14.2022–10.07.2023.

Таблица 5. Среднесуточные метеорологические параметры по реанализу CFSV2 в даты, соответствующие датам оценки ET: T_a – температура воздуха на высоте 2 м, °С; RH – относительная влажность воздуха на высоте 2 м, %; WS – скорость ветра на высоте 2 м, м/с; P – атмосферное давление на уровне подстилающей поверхности, гПа; $R_{S\downarrow}$ – суммарная радиация, МДж/(м² сут); ET_r – эталонная эвапотранспирация, мм/сут, а также результаты расчета эталонной эвапотранспирации ET_0 для безоблачного неба и низкой растительности по классической методике FAO-56 [20]

Дата	T_a	RH	WS	P	$R_{S\downarrow}$	ET_r	ET_0
2022-10-25	5.9	83	1.6	1000.2	2.5	0.84	1.45
2022-12-04	-12.2	83	2.9	1030.1	4.3	0.45	0.39
2023-04-02	5.2	96	1.6	996.7	18.3	2.34	3.26
2023-04-11	8.9	88	2.1	1002.8	20.9	3.16	4.34
2023-04-19	10.5	60	3.0	1003.6	15.0	3.68	5.15
2023-05-04	14.9	79	1.5	1003.7	25.4	4.29	5.31
2023-05-29	15.3	62	2.3	1000.6	28.4	5.86	5.97
2023-07-07	25.7	71	2.4	998.4	28.8	7.81	7.60
2023-07-16	14.8	96	2.8	993.3	20.4	3.91	6.16
2023-08-09	23.9	71	2.3	992.6	24.8	7.54	6.49
2023-09-01	20.3	55	2.0	998.3	20.4	6.25	4.89
2023-09-17	14.2	82	1.4	1007.5	15.1	3.06	3.81
2023-09-26	15.2	61	1.9	1010.3	13.2	3.72	3.46
2023-10-04	11.6	62	3.1	1001.8	13.4	4.71	2.83

более интенсивным, чем на залежном участке, испарением с поверхности и последующим иссушением профиля, что подтверждают данные об эвапотранспирации за апрель (табл. 5). Отметим, что среднемесячные значения эвапотранспирации (особенно для лета) должны быть значительно меньше, чем полученные при расчетах для конкретных дат, так как при расчетах используются снимки при безоблачном небе, следовательно, максимальной солнечной радиации. В облачные дни значения могут быть в несколько раз меньше.

Пахотный слой лугово-черноземных почв характеризовался оптимальными значениями влажности (от ВЗ до ПВ) в течение 26 сут для почвы разреза 2 и 72 сут для почвы разреза 3. В остальное время почвы были, преимущественно, недостаточно увлажнены. Влажность почв на глубинах 40 и 60 см превышала значения НВ на начало мониторинговых наблюдений. Такие условия увлажнения продлились вплоть до начала зимы для разреза 2 и конца января – для разреза 3. В начале–середине января, после зимней оттепели в пахотной лугово-черноземной почве разреза 2 наблюдалось промачивание почвенного профиля и его увлажнение, сменяемое периодом иссушения, вероятно, за счет движения влаги вниз. Следующий максимум увлажнения на глубинах 40 и 60 см для обоих

пахотных лугово-черноземных почв пришелся на конец марта и продлился до июня, сменившись иссушением. Отсутствие мониторинговых наблюдений за объемной влажностью почв с середины июля 2023 г. не позволяет достоверно определить их состояние на протяжении большей части летнего периода. Однако, полагаем, что влажность пахотных почв на глубине 20 см в летние месяцы оставалась такой же, как в почве залежи – ниже ВЗ, поскольку поступление осадков на поверхность почв было одинаково, а значения эвапотранспирации были достаточно велики, но ниже, чем в залежной почве.

Таким образом, пахотные лугово-черноземные почвы характеризовались, в целом, меньшей влажностью, чем почва залежи – что, в первую очередь, обусловлено меньшим количеством снега, накапливающимся на поверхности за холодный период, как это и было показано результатами снегомерной съемки. Данный вывод подтверждается как на основании изучения динамики влажности почв, так и на основании морфологического сравнения почв, значений коэффициента степени гидроморфизма.

Меньшая контрастность изменений условий увлажнения в почве залежи по сравнению с почвами пашни диагностирована на основании морфологических описаний почв и подтверждается данными

мониторинга влажности. В пахотных почвах за исследованный период выделено 5 (разрез 2) и 7 (разрез 3) обособленных периодов иссушения–увлажнения почвы (периоды, в течение которых значения объемной влажности почвы ниже ВЗ и выше НВ) на глубине 20 см; 3 (разрез 2) и 5 (разрез 3) периодов на глубине 40 см. В почве залежи выделено всего 2 обособленных периода на глубине 20 см и 3 периода на глубине 40 см. Средние значения изменения объемной влажности между сроками наблюдений также выше в пахотных почвах (табл. 6). Максимальная разность значений влажности в пахотных почвах между соседними сроками наблюдений превышает 15%; в почве залежи она составляет менее 10%. Продолжительность непрерывных периодов иссушения и увлажнения почвы наиболее велика для залежной почвы.

Лугово-черноземные почвы за период наблюдения в 2022–2023 гг. были достаточно сухими, несмотря на превышение среднегодового количества осадков (634 мм). Почвы были суше, чем в 1972 г. в период засухи (годовая сумма осадков – 470 мм). В 1972 г. влажность менее ВЗ в верхней части профиля наблюдалась в период с июня по сентябрь, во влажные 1969–1971 гг., она не опускалась ниже ВЗ в верхнем слое 0–20 см, тогда как в 2023 г. влажность менее ВЗ в пахотных почвах (верхние 20 см) устанавливалась с марта 2023 г., в почве залежи – с конца апреля 2023 г. Данные о влажности залежной почвы на глубине 20 см за летний, осенний и зимний период 2023 г. свидетельствуют, что верхний

слой по-прежнему остается иссушенным, несмотря на обильные дожди. Считаем, что основной причиной такой разницы во влажности почв является резкое изменение в источниках поступления влаги в почвы: в 1969–1972 гг. в качестве источника выступали не только атмосферные осадки, как и в 2023 г., но и грунтовые воды; их капиллярная кайма находилась в пределах почвенного профиля и подпитывала верхние почвенные горизонты [16]. В настоящее время грунтовые воды залегают глубже 4 м большую часть года и не оказывают воздействия на состояние верхней части почвенного профиля. Изменение в уровне грунтовых вод за полувековой период повлекло за собой изменение особенностей почвенного увлажнения. Выявленные особенности водного режима лугово-черноземных почв за 2022–2023 гг. больше соответствуют режиму влажности черноземов. Так, влажность верхней полуметровой толщи агрочернозема миграционно-мицелярного (Белгород) была в интервале НВ–ВЗ в апреле и начале мая 1972–1973 и 2005–2006 гг., ниже ВЗ – начиная с середины мая и в летний период 1972–1973 и 2005–2006 гг. [3]. Аналогичные данные получены в черноземе выщелоченном (Тамбовская область, Уваровский район) в рамках режимных наблюдений за влажностью почв в 2007 г. [6]. Несмотря на наблюдаемые изменения в водном режиме, почвы по-прежнему сохраняют следы переувлажнения – железо-марганцевые конкреции и сизо-охристые зоны в нижней части почвенного профиля.

Таблица 6. Контрастность изменений условий увлажнения за период 10.14.2022–10.07.2023. θ_i – объемная

влажность почвы (%) $\frac{\Delta\theta_i}{\Delta T_i}$ – изменение влажности между соседними сроками наблюдений, $N + 1$ – число сроков наблюдений, N – число интервалов между сроками. $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\Delta\theta_i}{\Delta T_i} \right| \pm SE$ – среднее значение изменения объемной влажности между сроками наблюдений \pm стандартная ошибка, %/сут, SE – стандартная ошибка изменения влажности между сроками, $\frac{std\left(\left|\frac{\Delta\theta_i}{\Delta T_i}\right|\right)}{\sqrt{N}}$; $std\left(\left|\frac{\Delta\theta_i}{\Delta T_i}\right|\right)$ – стандартное отклонение изменения объемной влажности между сроками наблюдений, %/сут

Почва, разрез	Глубина, см	Число обособленных периодов иссушения–увлажнения почвы ($\theta < \text{ВЗ} \dots \theta > \text{НВ}$)	$\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left \frac{\Delta\theta_i}{\Delta T_i} \right \pm SE$	$std\left(\left \frac{\Delta\theta_i}{\Delta T_i}\right \right)$
Лугово-черноземная почва, фон, разрез 1	20	3	0.81 ± 0.09	1.53
	40	2	0.65 ± 0.07	1.22
Пахотная лугово-черноземная почва, разрез 2	20	5	1.38 ± 0.16	2.65
	40	3	0.66 ± 0.07	1.18
Пахотная лугово-черноземная почва, разрез 3	20	7	3.35 ± 0.28	4.66
	40	5	3.01 ± 0.18	3.03

Сравнение динамики влажности залежной и пахотных почв за периоды наблюдения 1969–1971, 2022–2023 гг. свидетельствует о существенном влиянии особенностей эвапотранспирации выращиваемых в поле культур на почвенную влажность. В зависимости от культур были отмечены годы как с большей влажностью пахотных почв (возделывалась люцерна, 1969–1971), так и меньшей (возделывалась свекла, 1971; подсолнечник, 2023) по сравнению с почвой под залежью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании анализа сезонной (осень 2022–лето 2023 гг.) и многолетней (2022/2023 и 1969–1971 гг.) динамики объемной влажности залежной и пахотных лугово-черноземных почв (Токаревский район, Тамбовская область) уровня залегания грунтовых вод выявлено:

– за наблюдаемый период осень 2022–лето 2023 гг. лугово-черноземные почвы характеризовались повышенным периодом увлажнения в зимне-ранневесенний период, совпадающим с периодом снеготаяния и зимней оттепели; иссушением – в весенне-летний период. Содержание влаги менее 15% на 20 см наблюдалось в пахотных почвах с середины марта, в почве залежи – с конца апреля. Обильные летние и осенние осадки были недостаточны для восполнения запасов влаги в почвах.

– залежная лугово-черноземная почва характеризуется большей объемной влажностью, чем почвы пашни, что, в первую очередь, обусловлено большим количеством снега, накапливающимся на поверхности за холодный период, а также более интенсивным испарением с незадернованной поверхности пахотных почв в весенний период. Для верхних горизонтов пахотных почв характерна большая частота периодов увлажнения–иссушения и меньшая непрерывная продолжительность этих периодов – что подтверждается как данными мониторинга влажности, так и особенностями морфологического строения почв – формой карбонатных новообразований;

– мониторинг уровня грунтовых вод свидетельствует об их более глубоком залегании в настоящее время, чем 50 лет назад. Во влажные 2022–2023 гг. уровень грунтовых вод преимущественно залегал на глубине 4–5 м на пашне, и более 5 м – на залежном участке, в то время как в относительно влажные 1969–1970 гг. уровень грунтовых вод на участке не опускался глубже 2 м, в сухие 1971–1973 гг. – не глубже 4 м. Большая регулярность наблюдений и мониторинг уровня грунтовых вод в холодный период позволила выявить интервалы их зимнего поднятия, а также оценить продолжительность этих периодов в зимний и весенний сезоны (от одной до двух недель).

– изменение залегания уровня грунтовых вод привело к изменению водного режима лугово-черноземных почв – отсутствию подпитки верхней почвенной толщи капиллярной влагой. Режим влажности лугово-черноземных почв в 1969–1971 гг. складывался из повышенного весенне-раннелетнего увлажнения всего профиля (влажность больше НВ во всем профиле) и десуктивно-выпотного режима летом – капиллярным подтягиванием почвенной влаги к поверхности почв. В 2022–2023 гг. иссушение верхних 40 см до значений ниже ВЗ наблюдалось с конца весны – начала лета в пахотных почвах и с середины лета в залежной почве, периоды с влажностью больше НВ в пределах всей толщи 0–60 см не были диагностированы. Выявленные особенности водного режима лугово-черноземных почв за 2022–2023 гг. больше соответствуют водному режиму черноземов.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы благодарят главу крестьянско-фермерского хозяйства Александра Федоровича Толмачева за помощь в проведении исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 22-77-10062 “Гидрологическая и секвестрационная функции почв западного комплекса лесостепи”.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

В данной работе отсутствуют исследования человека или животных.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Онлайн-версия содержит дополнительные материалы, доступные по адресу <https://doi.org/10.31857/S0032180X24100059>

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айдаров И.П. Регулирование водно-солевого и питательного режимов орошаемых земель. М.: Агропромиздат, 1985. 304 с.
2. Ахтырцев А.Б., Адерихин П.Г., Ахтырцев Б.П. Лугово-черноземные почвы центральных областей Русской равнины. Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1981. 174 с.

3. *Базыкина Г.С., Овечкин С.В.* Влияние цикличности климата на водный режим и карбонатный профиль черноземов центра европейской части России и сопредельных территорий // Почвоведение. 2016. № 4. С. 475–488.
4. *Водяницкий Ю.Н.* Диагностика переувлажненных минеральных почв. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 81 с.
5. *Зайдельман Ф.Р.* Естественное и антропогенное переувлажнение почв. СПб.: Гидрометеоздат, 1992. 288 с.
6. *Зайдельман Ф.Р., Степанцова Л.В., Никифорова А.С., Красин В.Н., Сафронов С.Б., Красина Т.В.* Генезис и деградация черноземов Европейской России под влиянием переувлажнения. Способы защиты и мелиорации. Воронеж: Кварта, 2013. 352 с.
7. *Киреева М.Б., Илич В.П., Фролова Н.Л., Харламов М.А., Сазонов А.А., Михайлюкова П.Г.* Вклад климатических и антропогенных факторов в формирование маловодного периода в бассейне разрез Дон 2007–2015 гг. // Геориск. 2017. № 4. С. 10–21.
8. *Мильков Ф.Н.* Физико-географическое районирование Центрально-Черноземных областей. Воронеж: Изд-во Воронежского ун-та, 1961. 363 с.
9. *Молодцов В.А., Игнатова В.П.* Об определении состава поглощенных оснований в засоленных почвах // Почвоведение. 1975. № 6. С. 123–127.
10. Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство)”. М.: Изд-во МБА, 2021. Т. 3. 700 с.
11. *Поздняков С.П., Ведяшкина В.В., Филимонова Е.А., Позднякова Н.И.* Ретроспективный анализ многолетних колебаний уровней воды в Докучаевском колодце в Каменной Степи // Вестник Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. С. 110–126.
12. Полевой определитель почв. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева, 2008. 182 с.
13. Почвенный покров и земельные ресурсы Российской Федерации. М.: Почв. ин-т им. В.В. Докучаева РАСХН, 2001. 400 с.
14. *Роде А.А.* Водный режим почв и его регулирование. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 119 с.
15. *Савин И.Ю., Виндекер Г.В.* Некоторые особенности использования оптических свойств поверхности почв для определения их влажности // Почвоведение. 2021. № 7. С. 806–814.
16. *Самойлова Е.М.* Луговые почвы лесостепи. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 283 с.
17. *Степанцова Л.В., Красин В.Н.* Количественный показатель глубины залегания грунтовых вод в черноземовидных почвах севера Тамбовской равнины // Вестн. МичГАУ. 2011. Ч. 1. № 2. С. 106–110.
18. *Хохлова О.С.* Карбонатное состояние степных почв как индикатор и память их пространственно-временной изменчивости. Дис. ... докт. геогр. наук. М., 2008. 331 с.
19. *Шеин Е.В., Болотов А.Г., Дембовецкий А.В.* Гидрология почв агроландшафтов: количественное описание, методы исследования, обеспеченность почвенных запасов влаги // Почвоведение. 2021. Т. 55. № 9. С. 1076–1084.
20. *Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M.* FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 1998. V. 56(97). 156 p.
21. *Allen R.G., Tasumi M., Trezza R.* Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model // J. Irrigation Drainage Engineering. 2007. V. 133. № 4. P. 380–394.
22. *Allen R.G., Walter I.A., Elliott R., Howell R., Itenfisu D., Jensen M.* The ASCE standardized reference evapotranspiration equation // Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers. 2005. V. 57. 59 p.
23. *Daly E., Porporato A.* A review of soil moisture dynamics: From rainfall infiltration to ecosystem response // Environ. Engineer. Sci. 2005. V. 22(1). P. 9–24. <https://doi.org/10.1089/ees.2005.22.9>
24. *Deng, L., Peng C., Kim D.G., Li J., Liu Y., Hai X., Kuzyakov Y.* Drought effects on soil carbon and nitrogen dynamics in global natural ecosystems // Earth-Sci. Rev. 2021. V. 214. P. 103501. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103501>
25. *Dorigo W., Himmelbauer I., Aberer D., Schremmer L., Petrakovic I., Zappa L., Preimesberger W. et al.* The International Soil Moisture Network: serving Earth system science for over a decade // Hydrology Earth System Sci. 2021. V. 25. P. 5749–5804. <https://doi.org/10.5194/hess-25-5749-2021>
26. *Fil P.P., Yurova A.Y., Dobrokhотов A., Kozlov D.* Estimation of infiltration volumes and rates in seasonally water-filled topographic depressions based on remote-sensing time series // Sensors. 2021. V. 21. № 21. P. 7403.
27. *Harris I.C.* CRU TS v4.03: Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) version 4.03 of high-resolution gridded data of month-by-month variation in climate (Jan. 1901- Dec. 2018). Centre for Environmental Data Analysis (CEDA). 2019. <https://doi.org/10.5285/10d3e3640f004c578403419aac167d82>
28. *Hupet F., Vanclooster M.* Intraseasonal dynamics of soil moisture variability within a small agricultural maize cropped field // J. Hydrology. 2002. V. 261. № 1–4. P. 86–101. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00016-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00016-1)

29. *Khitrov N., Smirnova M., Lozbenev N., Levchenk E., Gribov V., Kozlov D., Rukhovich D., Kalinina N., Koroleva P.* Soil cover patterns in the forest-steppe and steppe zones of the east-european plain // *Soil Sci. Annual.* 2019. V 70(3). P. 198–210. <https://doi.org/10.2478/ssa-2019-0018>
30. *Lal R.* Managing Chernozem for Reducing Global Warming // *Regenerative Agriculture.* 2021. P. 81–93. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72224-1_7
31. *Olson D.M., Dinerstein E., Wikramanayake E.D., Burgess N.D., Powell G.V. N., Underwood E.C., D'Amico J.A. et al.* Terrestrial ecoregions of the world: a new map of life on Earth // *Bioscience.* 2001. V. 51(11). P. 933–938.
32. *Pablos M., Martínez-Fernández J., Piles M., Sánchez N., Vall-llossera M., Camps A.* Multi-temporal evaluation of soil moisture and land surface temperature dynamics using in situ and satellite observations // *Remote Sensing.* 2016. V. 8. № 7. P. 587. <https://doi.org/10.3390/rs8070587>
33. *Porporato A., Daly E., Rodriguez-Iturbe I.* Soil water balance and ecosystem response to climate change // *The American Naturalist.* 2004. V. 164. № 5. P. 625–632. <https://doi.org/10.1086/424970>
34. *Rosenbaum U., Bogena H.R., Herbst M., Huisman J.A., Peterson T.J., Weuthen A., Western A.W., Vereecken H.* Seasonal and event dynamics of spatial soil moisture patterns at the small catchment scale // *Water Resources Research.* 2012. V. 48. № 10. <https://doi.org/10.1029/2011WR011518>
35. *Saha S., Moorthi S., Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Behringer D., Hou Y. T., Chuang H.Y., Iredell M., Ek M.* The NCEP climate forecast system version 2 // *J. Climate.* 2014. V. 27(6). P. 2185–2208.
36. *Seneviratne S.I., Corti T., Davin E.L., Hirschi M., Jaeger E.B., Lehner I., Orlowsky B., Teuling A.J.* Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review // *Earth-Science Reviews.* 2010. V. 99. № 3–4. P. 125–161. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004>
37. *Vereecken H., Huisman J.A., Pachepsky Y., Montzka C., Van Der Kruk J., Bogena H., Weihermüller L., Herbst M., Martinez G., Vanderborght J.* On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale // *J. Hydrology.* 2014. V. 516. P. 76–96. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.061>
38. *Wang C., Wang S., Fu B., Zhang L., Lu N., Jiao L.* Stochastic soil moisture dynamic modelling: a case study in the Loess Plateau, China // *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh.* 2018 V. 109(3–4). P. 437–444. <https://doi.org/10.1017/S1755691018000658>
39. *Zheng J., Zhao T., Lü H., Shi J., Cosh M. H., Ji D., Kang C.S.* Assessment of 24 soil moisture datasets using a new in situ network in the Shandian River Basin of China // *Remote Sensing of Environment.* 2022. V. 271. P. 112891. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112891>
40. *Zhou T., Han C., Qiao L., Ren C., Wen T., Zhao C.* Seasonal dynamics of soil water content in the typical vegetation and its response to precipitation in a semi-arid area of Chinese Loess Plateau // *J. Arid Land.* 2021. V. 13. P. 1015–1025. <https://doi.org/10.1007/s40333-021-0021-5>

Seasonal and Multi-Year Dynamics of Soil Moisture in Meadow-Chernozem Soils (Oka-Don Lowland)

M.A. Smirnova^{1, 2, *}, D.R. Bardashov^{1, 2}, P.P. Fil¹, N.I. Lozbenev¹, and A.V. Dobrokhotov^{1, 3}

¹*Dokuchaev Soil Science Institute, Moscow, 119017 Russia*

²*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119999 Russia*

³*Agrophysical Research Institute, St. Petersburg, 195220 Russia*

*e-mail: summerija@yandex.ru

The observed climate changes and increasing groundwater levels in the forest-steppe region should be reflected in the water regime of the Gleyic Chernozem soils. This article analyzes the daily and seasonal dynamics of volumetric moisture in background Gleyic Chernozem (Siltic, Pachic) and two arable Gleyic Chernozem soils (Siltic, Aric, Pachic), as well as the level of groundwater in the Tokarevsky district of the Tambov region during the period from autumn 2022 to summer 2023. The obtained data is compared with regime observations of volumetric moisture and groundwater levels of these soils from 1969–1971. The use of automated monitoring systems for soil moisture and groundwater levels has allowed for continuous data collection on soil moisture, assessment of the diurnal dynamics, and detailed tracking of seasonal changes in soil moisture. The background chernozem soil is characterized by higher moisture levels compared to arable soils; the upper horizons of cultivated soils are characterized

by a higher frequency of wetting-drying periods and a shorter continuous duration of these periods – which is confirmed both by moisture monitoring data and by the morphological features of the soils, such as the form of carbonate neoformations and the depth of their detection. During the observation period in 2022–2023, the meadow-chernozem soils were relatively dry, despite the higher than normal annual precipitation. Moisture levels conducive to wilting in the top 20 cm layer of cultivated soils were established from March 2023, and in the background soil from the end of April 2023. Periods with humidity exceeding the minimum moisture capacity within the entire 60 cm depth were not observed during the entire observation period. The soils were drier than in the dry year of 1972, when the humidity was less than the wilting point in the upper part of the profile from June to September. In the wet years of 1969–1970, the humidity did not drop below the wilting point in the upper 20 cm layer throughout the observation period. The main reason for this difference in humidity is the change in the level of groundwater: in 2022–2023, the majority of the groundwater was more than 4 m deep, whereas in 1969 it did not go deeper than 2 m and in 1971 – deeper than 4 m. As a result, the soil's uptake of moisture through capillary action did not occur in 2022–2023, and the water regime of the meadow-chernozem soils more closely resembled the water regime of chernozems.

Keywords: hydropedology, Chernozems, forest-steppe, dynamics of groundwater level, climate change, Tambov oblast